特集「防災緑化と土砂災害」

異なる土壌環境下における根系構造と引き抜き抵抗力との関係

山瀬敬太郎^{*1)}・谷川東子²⁾・池野英利³⁾・藤堂千景¹⁾・大橋瑞江³⁾
檀浦正子^{4,5)}・平野恭弘⁶⁾

- 1) 兵庫県立農林水産技術総合センター Hyogo Prefectural Technology Center for Agriculture, Forestry and Fisheries
- 2) 森林総合研究所関西支所 Kansai Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute
- 3) 兵庫県立大学環境人間学部 School of Human Science and Environment, University of Hyogo
- 4) 京都大学地球環境学堂 Graduate School of Global Environmental Studies, Kyoto University
- 5) 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University
- 6) 名古屋大学大学院環境学研究科 Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

摘要：高木2種（クロマツ、スギ）の樹木根系が土砂崩壊防止に寄与する抵抗力を評価するために、土壌圧密が異なる環境下において、根の引き抜き試験を実施した。樹種ごとに、引き抜いた根系のパラメータ（根元直径、分岐数、分岐角度、根の長さ、表面積、体積）と引き抜き抵抗力との関係を解析した結果、根元直径 D （mm）は、分岐角度や根の長さ、表面積、体積との間に相関がみられるものの、これらのパラメータよりも相関係数が高いこと、土壌圧密（容積重、土壌硬度）の影響を受けにくいことから、引き抜き抵抗力 T （N）を推定するのに適したパラメータであることを明らかにした。引き抜き抵抗力は、クロマツが $T=19.4 \times D^{1.5}$ （ $R^2=0.716$ ）、スギが $T=33.6 \times D^{1.5}$ （ $R^2=0.792$ ）の関係式を用いて、根元直径から精度高く推定できることがわかった。

キーワード：崩壊防止機能、水平根、引き抜き抵抗力、土壌圧密、根系構造、根元直径

YAMASE, Keitaro, TANIKAWA, Toko, IKENO, Hidetoshi, TODO, Chikage, OHASHI, Mizue, DANNOURA, Masako and HIRANO, Yasuhiro: **Relationship between tree root system and pull-out resistance under different soil conditions**

Abstract In order to clarify the soil reinforcement ability of two tree species (*Pinus thunbergii* Parl. and *Cryptomeria japonica* (L. fil.) D. Don), pull-out tests were carried out for evaluating the pull-out resistance of root segments of the tree species. Thereafter, we analyzed the relationship between root system parameters (i.e. basal root diameter, number of branching, angle, root length, surface area, volume) and pull-out resistance. Our results suggest that the basal root diameter is the highest correlation with the pull-out resistance among parameters, and is the most suitable parameter to estimate the pull-out resistance in sites with different bulk density and soil hardness. The equations of the relationship between basal root diameter D (mm) and pull-out resistance T (N) are $T=19.4 \times D^{1.5}$ ($R^2=0.716$) for *P. thunbergii* and $T=33.6 \times D^{1.5}$ ($R^2=0.792$) for *C. japonica*.

Key words: soil reinforcement, lateral root, pull-out resistance, soil compaction, tree root system, basal root diameter

1. はじめに

近年、短時間の局地的な大雨によって土砂災害が多発して

いる。災害の元凶である土砂の発生源は、山地上流部の崩壊地であることがほとんどであり、災害が起こるたびに森林の土砂崩壊防止機能が問われている⁷⁾。

樹木根系が持つ土砂崩壊防止機能の定量化については、安定解析によって斜面安全率を算定する枠組みが確立されている¹¹⁾。これは、樹木根系について鉛直根と水平根に区分したうえで、それぞれの根の空間分布をモデルにより数値化し、その空間分布量に基づいて根の抵抗力を求め、斜面安全率を算定する方法である¹¹⁾。さらに鉛直根については、ワイブル分布を適用した精度の高い改良モデルに基づいた算定²⁾も提示されている。

一方、崩壊時の崩壊側縁に存在する水平根については、既往モデル^{2, 11)}では、水平根が鉛直根に比べ土砂崩壊防止機能への寄与が低いとみなされてきた。しかし、これらは過小評価である^{6, 7)}ことも指摘されており、水平根を含む三次元安定解析によって、水平根の評価は土砂崩壊防止機能の定量化に重要であることが示されている⁷⁾。

水平根の抵抗力は、根の引き抜き試験によって把握することができ、いくつかの既往研究がみられる。例えば、引き抜き抵抗力に寄与するパラメータについては、土壌中の根の深さ¹⁰⁾、長さ¹⁰⁾、主軸根と側根との分岐角度¹⁰⁾や、根の本数⁴⁾、直径⁴⁾、根の間隔⁵⁾、方向性⁵⁾によって変化することが実験的に示されている。これらの研究は、根系構造が根の引き抜き抵抗力に関わっていることを示唆している。

また野外条件下では、引き抜き抵抗力が地形・地質・土質⁷⁾の影響を受けず、土壌水分⁷⁾や樹種⁷⁾、根を引き抜く方向⁶⁾の影響を受けるとする研究成果が得られている。一方、根系構造に関する研究は不足しており、根の深さ、引き抜いた形状や根の破壊パターンと引き抜き抵抗力との関係を調べた研究では、「関係がある⁶⁾」と「関係がない⁷⁾」の相反する結果が得られている。したがって野外条件下で、根系構造と引き抜き抵抗力との関係を詳細に解析し、引き抜き抵抗力の推定に適したパラメータを抽出する必要がある。

そこで本研究では、野外に生育するクロマツ (*Pinus thunbergii* Parl.) とスギ (*Cryptomeria japonica* (L.f.) D. Don) を対象に、根の形状に着目した引き抜き試験を実施することで、引き抜き抵抗力の推定に適した根系の構造パラメータを明らかにすることを目的とした。さらにこれらの実験を土壌の容積重や硬度が異なる複数の試験地で実施し、土壌環境が根系構造のパラメータに及ぼす影響、さらに引き抜き抵抗力とこれらのパラメータとの関係に及ぼす影響を明らかにした。

2. 調査地および調査方法

2.1 対象樹種と調査地の概要

調査対象とした樹種は、高木のクロマツとスギである。クロマツ調査地は4箇所あり、兵庫県神戸市 (34°43'11" N, 135°10'08" E, 以下、神戸調査地) は六甲山系に位置し、土壌は六甲花崗岩を基岩とした褐色森林土であるのに対し、兵庫県新温泉町 (35°37'39" N, 134°36'44" E, 新温泉調査地)、愛知県田原市の2地点、A地点 (34°38'36" N, 137°03'46" E, 田原A調査地)、B地点 (34°38'40" N, 137°03'27" E, 田原B調査地) はいずれも海岸林で、土壌は砂質土である。また、スギ調査地は2箇所あり、兵庫県神戸市 (34°43'11" N, 135°10'08" E, 神戸調査地) はクロマツ調査地に隣接した場所で、六甲花崗岩を基岩とした褐色森林土であり、兵庫県宍粟市 (34°59'11" N, 134°32'13" E, 宍粟調査地) は古生層粘板岩を基岩とした褐色森林土である。

2.2 根の引き抜き抵抗力の測定

各調査地において、2-11本の対象木を選定した (表-1)。クロマツ調査地の中で、田原B調査地の個体サイズは小さく、平均胸高直径5.3 cm、平均樹高2.7 mであった。一方、神戸調査地は個体サイズが大きく、50.8 cm、22.5 mであった。スギ調査地では、宍粟調査地の個体サイズが小さく、13.3 cm、12.2 mであったのに対し、神戸調査地の個体サイズが大きく、30.6 cm、22.0 mであった (表-1)。

根の引き抜き抵抗力の測定は、対象木の樹幹からランダムな距離に鉛直面の土壌トレンチ (深さ約30 cm) を掘削し、断面に露出した根 (根元直径1 mm以上) を対象に実施した。遠心方向に伸長する根元部を特殊な鉋でつかみ、根の伸長方向とは反対方向に引き抜くこととし、人力あるいは手動ウィンチを用いて、根1本を引き抜くのに要する引張力 (引き抜き抵抗力) を測定した。測定はIMADA社製のデジタルフォースゲージ (ZP-1000 N (標準型) あるいはZPH-5000 N (高荷重型)) を使用、最小分解能はいずれも1 Nを用いた。また、測定前に土壌断面における根元直径と根元部の地表からの深さ位置を計測した。以降の議論では、引き抜き試験によって土壌から引き抜いた側根を含む根全体を根系 (root system) と呼び、これを調査対象とした。

表-1 調査対象木

Table 1 Characteristics of the target trees.

Species	Site	n	DBH (cm)			H (m)		
			Ave.	Min.	Max.	Ave.	Min.	Min.
<i>P. thunbergii</i>	Kobe, Hyogo	2	50.8	49.8	51.8	22.5	22.3	22.7
	Shin-onsen, Hyogo	4	20.3	14.3	24.2	12.8	10.4	14.3
	Tahara site A, Aichi	7	7.0	3.1	16.0	5.1	3.7	8.3
	Tahara site B, Aichi	11	5.3	2.9	14.5	2.7	2.2	4.9
<i>C. japonica</i>	Kobe, Hyogo	3	30.6	25.1	38.3	22.0	21.9	22.1
	Shiso, Hyogo	4	13.3	11.6	14.4	12.2	12.0	12.5

図-1 引き抜き抵抗性に影響する根系パラメータ

Fig. 1 Root system parameters affecting pull-out resistance

2.3 根系構造の解析

根系構造を解析するために、引き抜き抵抗性を測定した根系を、分岐部から分岐部までのセグメントに分割し(図-1)、根系の分岐数と、セグメント(i)ごとの長さ、求心側と遠心側のそれぞれの根直径を計測した(図-1)。また、主軸根と側根あるいは側根と側根の間の分岐角度を計測し(図-1)、引き抜き方向と反対方向に対する角度に換算し、セグメントごとの値とした。各根系に対する分岐角度は、換算した分岐角度の最大値の値とした。さらに、根系全体の長さ合計(以下、 $\Sigma(\text{Length})_i$, 単位: cm)と表面積合計($\Sigma(\text{Surface area})_i$, cm^2)、体積合計($\Sigma(\text{Volume})_i$, cm^3)を求めるとともに、換算した分岐角度を用いて、引き抜き方向と反対方向に分岐根を投影した際の長さ合計($\Sigma((\text{Length})_i \times (\cos \text{Angle}))$)と表面積合計($\Sigma((\text{Surface area})_i \times (\cos \text{Angle}))$)、体積合計($\Sigma((\text{Volume})_i \times (\cos \text{Angle}))$)を算出した(図-1)。引き抜き試験時の破壊パターンが引き抜き抵抗性に影響を与える⁶⁾可能性があるため、本研究では、引き抜き試験を実施した根系に破断がみられ、その破断部位を含むセグメントの根直径(求心側)が1 mm 以上の場合、その根系を破断根系と定義し、破断されずに根全体が引き抜けた根系とは別に解析することとした。

2.4 土壌環境

根系の構造や引き抜き抵抗性に影響すると考えられる土壌パラメータとして、体積含水率と容積重、土壌硬度を測定し

た。ここで、容積重と土壌硬度は土壌圧密の指標とした。引き抜き抵抗性の測定は、本研究では深さ30 cmまでに位置する根を対象としたので、0-10 cmと20-30 cm(ただし、クロマツの新温泉調査地は10-20 cm)の2層の土壌層で測定した。体積含水率と容積重は、採土円筒(100 ml)を層ごとに各3個(ただし、クロマツの田原A調査地および田原B調査地の0-10 cmは各9個)採取し、平均値を算出した。また土壌硬度は、山中式土壌硬度計を用いて層別に10回測定し、平均値を算出した。

3. 結果

3.1 根元直径-引き抜き抵抗性の関係

引き抜き抵抗性の測定は、樹種ごとに調査地あたり49-74本の根系で実施した。測定した根系数はクロマツ230本、スギ100本の計330本であり(表-2)、根元直径はクロマツ1.4-29.8 mm、スギ1.0-23.8 mmの範囲であった。また、破断根を含まない根系数は、1調査地あたり19-55本、樹種別ではクロマツ151本、スギ60本の計211本であり(表-2)、根元直径の範囲は、クロマツ1.4-29.8 mm、スギ1.0-23.8 mmであった。破断根系が多かった調査地は、クロマツの神戸調査地62.7%(引き抜き抵抗性を測定した全調査根系のうち、測定時に破断した根系の割合)、スギの宍粟調査地42.9%、スギの神戸調査地37.3%であった(表-2)。

既往研究^{1,7)}では、根の引き抜き抵抗性は、次の根元直径の累乗関数で示される。

$$T = a \times D^b \quad T: \text{根1本あたりの引き抜き抵抗性 [N]},$$

$$D: \text{根元直径 [mm]}, a, b: \text{回帰係数}$$

本研究では、樹種や破断根の有無による T と D の関係式の差異を確認するために、回帰係数 b の値が1.10-1.80の範囲⁶⁾であることから $b=1.50$ に固定し、回帰係数 a の変動を計算した。具体的には、樹種別に、破断根を含む根系の測定値から算出した関係式と、破断根を含まない根系から算出した関係式を、調査地ごとに求めた。

クロマツの回帰係数 a は、破断根を含む根系が18.1-22.8、破断根を含まない根系が17.4-19.2、スギの回帰係数 a は、破断根を含む根系が33.3-33.7、破断根を含まない根系が32.0-33.6であり(表-3)、いずれの調査地とも、破断根を含

表-2 全調査根系数と破断根を含まない根系数、根系破断率

Table 2 Total number of roots, number of roots without breaking and percentage of breaking root number per total root number.

Species	Site	Total number of roots	Number of roots without breaking	Breaking root number per total root number (%)
<i>P. thunbergii</i>	Kobe, Hyogo	51	19	62.7
	Shin-onsen, Hyogo	74	55	25.7
	Tahara site A, Aichi	51	36	29.4
	Tahara site B, Aichi	54	41	24.1
<i>C. japonica</i>	Kobe, Hyogo	51	32	37.3
	Shiso, Hyogo	49	28	42.9

表-3 全調査根系および破断根を除く根系から算出した、回帰係数 a と決定係数の比較

Table 3 Coefficient 'a' and coefficient of determination calculated from all root systems and root systems without breaking roots.

Species	Site	Coefficient 'a'		Coefficient of determination (R^2)	
		All	No break	All	Without breaking
<i>P. thunbergii</i>	Kobe, Hyogo	22.8	18.8	0.780	0.821
	Shin-onsen, Hyogo	18.1	17.4	0.692	0.706
	Tahara site A, Aichi	19.8	19.2	0.852	0.878
	Tahara site B, Aichi	18.6	18.0	0.648	0.563
<i>C. japonica</i>	Kobe, Hyogo	33.7	33.6	0.735	0.779
	Shiso, Hyogo	33.3	32.0	0.911	0.854

まない根系の回帰係数 a が、破断根を含む根系から算出した回帰係数 a よりも小さかった。

また、クロマツの決定係数 R^2 は、破断根を含む根系が 0.648–0.880、破断根を含まない根系が 0.563–0.878、スギの決定係数 R^2 は、破断根を含む根系が 0.795–0.911、破断根を含まない根系が 0.779–0.854 であり（表-3）、決定係数 R^2 の大小は破断根の有無とは関係がみられなかった。

破断根を含む根系について、根元直径と引き抜き抵抗との関係式を調査地間で比較したところ、同一樹種における有意差はみられなかった（分散分析、 $p > 0.05$ ）。この傾向は、破断根を含まない根系から算出した関係式でも同様であり、同一樹種において調査地間で有意差はみられなかった（分散分析、 $p > 0.05$ ）。

3.2 根元直径以外の根系パラメータと引き抜き抵抗との関係

引き抜き抵抗に寄与する可能性がある根元直径以外の根系パラメータについて、引き抜き抵抗との関係を解析した。根が破断し欠損すると、その根系による引き抜き抵抗が過小評価になると考え、ここでの解析は破断根を含まない根系のみを対象とした（クロマツ 151 本、スギ 60 本の計 211 本、表-2）。クロマツ、スギの 6 調査地全てにおいて、

引き抜き抵抗と相関が有意であった根系パラメータは、根元直径以外では、根系全体の Σ (Length)_i、 Σ (Surface area)_i、 Σ (Volume)_i、 Σ ((Surface area)_i × (cosAngle)_i)、 Σ ((Volume)_i × (cosAngle)_i) であった（表-4）。これら 5 つの根系パラメータについて根元直径との関係をみると、いずれのパラメータにおいても、6 調査地全てで有意に高い相関関係がみられた（表-5）。

3.3 土壌環境

クロマツ林土壌の体積含水率は 2.7–34.6% の範囲であり、①体積含水率が高い神戸調査地 0–10 cm、②神戸調査地 20–30 cm、新温泉調査地 0–10 cm、③新温泉調査地 10–20 cm と、④体積含水率が低い田原 A 調査地 0–10 cm、同 20–30 cm、田原 B 調査地 0–10 cm、同 20–30 cm の 4 群間に、それぞれ有意差がみられた（Tukey-Kramer 法、 $p < 0.05$ 、表-6）。また、スギ林土壌の体積含水率は 18.0–37.7% であり、①体積含水率が高い神戸調査地 0–10 cm、宍粟調査地 0–10 cm、同 20–30 cm と、②体積含水率の低い神戸調査地 20–30 cm の 2 群間に有意差がみられた（Tukey 法、 $p < 0.05$ 、表-6）。

クロマツ林土壌の容積重は 0.90–1.62 g cm⁻³ であり、①容積重が大きい神戸調査地 0–10 cm、同 20–30 cm と、②容積重が小さい田原 A 調査地 0–10 cm と田原 B 調査地 0–10 cm

表-4 各調査地における引き抜き抵抗に寄与する根系パラメータ

Table 4 Specific parameters affecting pull-out resistance for each site.

Parameter	<i>P. thunbergii</i>								<i>C. japonica</i>			
	Kobe		Shin-onsen		Tahara siteA		Tahara siteB		Kobe		Shiso	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Depth	0.121		0.198		0.088		0.243		0.613	***	0.271	
Number of branching	0.557	**	0.174		0.156		0.420	*	0.845	***	0.604	**
Angle _{max}	0.233		0.010		0.079		−0.084		0.388		0.467	*
Σ (Length) _i	0.731	***	0.406	*	0.610	***	0.530	**	0.770	***	0.406	*
Σ (Surface area) _i	0.806	***	0.652	***	0.870	***	0.763	***	0.771	***	0.768	***
Σ (Volume) _i	0.738	***	0.788	***	0.888	***	0.664	***	0.716	***	0.792	***
Σ ((Length) _i × (cosAngle) _i)	0.772	***	0.496	***	0.632	***	0.493	*	0.615	***	0.171	
Σ ((Surface area) _i × (cosAngle) _i)	0.813	***	0.723	***	0.873	***	0.754	***	0.695	***	0.575	**
Σ ((Volume) _i × (cosAngle) _i)	0.707	***	0.842	***	0.885	***	0.503	**	0.504	**	0.394	*
Basal root diameter	0.941	***	0.820	***	0.940	***	0.793	***	0.887	***	0.910	***

*** : p -value < 0.001 , ** : < 0.01 , * : < 0.05 , ns : not significant

の2群間に有意差がみられた (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$, 表-6)。また, スギ林土壤の容積重は $0.91\text{--}1.23\text{ g cm}^{-3}$ であり, ①容積重が大きい穴栗調査地 0-10 cm, 同 20-30 cm と, ②容積重が小さい神戸調査地 0-10 cm の2群間に, それぞれ有意差がみられた (Tukey 法, $p < 0.05$, 表-6)。

クロマツ林の土壤硬度は $0.23\text{--}3.32\text{ kg cm}^{-2}$ であり, ①土壤硬度が大きい神戸調査地 20-30 cm, ②神戸調査地 0-10 cm, ③新温泉調査地 10-20 cm と, ④土壤硬度が小さい新温泉調査地 0-10 cm, 田原 A 調査地 0-10 cm, 同 20-30 cm, 田原 B 調査地 0-10 cm, 同 20-30 cm の4群間に, それぞれ有意差がみられた (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$, 表-6)。また, スギ林の土壤硬度は $1.96\text{--}4.05\text{ kg cm}^{-2}$ であり, ①神戸調査地 0-10 cm と, ②穴栗調査地 0-10 cm, 同 20-30 cm の2群間, あるいは①神戸調査地 0-10 cm, 同 20-30 cm と, ②穴栗調査地 20-30 cm の2群間に, それぞれ有意差がみられた (Tukey 法, $p < 0.05$, 表-6)。

3.4 土壤環境と根系パラメータとの関係

引き抜き抵抗力は, 土と根との間に生じる周面摩擦力によって発揮される⁹⁾。ここでは, 根系パラメータのうち表面積合計を周面摩擦力の指標とし, 場所によって異なる容積重や土壤硬度との関係を解析した。

クロマツについて, 解析可能な根系数が15以上ある深さ別調査地 (神戸調査地 0-10 cm と新温泉調査地 0-10 cm, 新温泉調査地 10-20 cm, 田原 A 調査地 0-10 cm, 田原 B 調査地 0-10 cm) の5区分で, 根元直径あたりの表面積合計を算出した。根元直径あたりの表面積合計としたのは, 根元直径が異なると根系全体の長短が変化し, 表面積の大小に影響を与えると考えたからである。図-2は, 根元直径あたりの表面積合計の平均値 (Mean) と標準偏差 (SD) を図示したものである。容積重に有意差がみられた神戸調査地 0-10 cm (容積重 1.59 g cm^{-3} , 表-6) と田原 B 調査地 0-10 cm (容積重 0.90 g cm^{-3} , 表-6) の根元直径 1 mm あたりの表面積合計は, それぞれ $906.7 \pm 581.3\text{ cm}^2\text{ mm}^{-1}$ (Mean $\pm$ SD, 以下同様), $2087.0 \pm 1762.6\text{ cm}^2\text{ mm}^{-1}$ であり (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$), 容積重が小さいほど, 表面積合計は大きくなる傾向がみられた (図-2)。土壤硬度と表面積合計の間でも同様の傾向がみられ, 土壤硬度が有意に大きい神戸調査地 0-10 cm (1.69 kg cm^{-2} , 表-6) において表面積合計は小さく, 土壤硬度が有意に小さい田原 B 調査地 0-10 cm (0.23 kg cm^{-2} , 表-6) で, 表面積合計は大きかった。

スギでは, 容積重に有意差がみられた穴栗調査地 0-10 cm (容積重 1.20 g cm^{-3} , 表-6) と神戸調査地 0-10 cm (容積

表-5 各調査地における根元直径と相関がある根系パラメータ

Table 5 Specific parameters correlating with basal root diameter for each site.

Parameter	<i>P. thunbergii</i>								<i>C. japonica</i>			
	Kobe		Shin-onsen		Tahara siteA		Tahara siteB		Kobe		Shiso	
	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value	r	p-value
Σ (Length) _i	0.800	***	0.570	**	0.573	**	0.560	**	0.739	***	0.421	*
Σ (Surface area) _i	0.884	***	0.784	***	0.834	***	0.790	***	0.809	***	0.754	***
Σ (Volume) _i	0.829	***	0.869	***	0.882	***	0.791	***	0.727	***	0.744	***
Σ ((Surface area) _i $\times$ (cosAngle) _i)	0.889	***	0.833	***	0.820	***	0.784	***	0.746	***	0.725	***
Σ ((Volume) _i $\times$ (cosAngle) _i)	0.794	***	0.903	***	0.896	***	0.735	***	0.665	***	0.444	*

表-6 調査地の土壤環境

Table 6 Soil physical conditions in the study sites.

Species	Site	Depth	Volume water content (%)	Bulk density (g cm^{-3})	Soil hardness (kg cm^{-2})
<i>P. thunbergii</i>	Kobe, Hyogo	0-10 cm	34.6 ± 4.3 a	1.59 ± 0.09 a	1.69 ± 0.28 a
		20-30 cm	19.0 ± 3.7 b	1.62 ± 0.11 a	3.32 ± 0.69 b
	Shin-onsen, Hyogo	0-10 cm	16.1 ± 3.1 b	1.29 ± 0.15 ab	0.52 ± 0.20 c
		10-20 cm	8.8 ± 2.1 c	1.41 ± 0.05 ab	1.08 ± 0.39 d
	Tahara site A, Aichi	0-10 cm	6.0 ± 3.2 d	0.99 ± 0.39 b	0.38 ± 0.09 c
		20-30 cm	4.5 ± 3.0 d	1.47 ± 0.06 ab	0.56 ± 0.09 c
	Tahara site B, Aichi	0-10 cm	5.8 ± 2.6 d	0.90 ± 0.29 b	0.23 ± 0.07 c
		20-30 cm	2.7 ± 0.2 d	1.36 ± 0.13 ab	0.44 ± 0.11 c
<i>C. japonica</i>	Kobe, Hyogo	0-10 cm	33.9 ± 3.1 a	0.91 ± 0.16 a	1.96 ± 0.42 a
		20-30 cm	18.0 ± 0.4 b	0.99 ± 0.04 ab	2.52 ± 0.94 ab
	Shiso, Hyogo	0-10 cm	37.7 ± 1.2 a	1.20 ± 0.10 b	3.44 ± 0.81 bc
		20-30 cm	35.6 ± 3.0 a	1.23 ± 0.09 b	4.05 ± 1.91 c

Different alphabets indicate significant differences among sites in each species and depth at 5% level (Tukey's method or Tukey-Kramer's method).

図-2 容積重と根元直径あたりの表面積合計との関係。異なるアルファベット間には、多重比較の結果、有意差があることを示す (Tukey-Kramer 法, $p < 0.05$)。また、***は平均値の差の検定の結果、有意差があることを示す (Student の t 検定, $p < 0.001$)。縦線は標準偏差 (SD)。

Fig. 2 Relationship between bulk density and total surface area per basal root diameter. Different alphabets above the bars indicate significant differences among the bulk densities in *Pinus thunbergii* according to Tukey-Kramer's method ($p < 0.05$). *** indicates significant difference between the bulk densities in *Cryptomeria japonica* according to Student's t-test ($p < 0.001$). Error bars indicate SD.

重 0.91 g cm^{-3} 、表-6) の表面積合計は、それぞれ $557.1 \pm 548.9 \text{ cm}^2 \text{ mm}^{-1}$ 、 $1750.6 \pm 1262.9 \text{ cm}^2 \text{ mm}^{-1}$ で有意差がみられ (Student's t-test, $p < 0.01$)、容積重が小さいと表面積合計は大きかった (図-2)。土壌硬度と表面積合計の間でも同様の傾向がみられ、土壌硬度が有意に大きい宍粟調査地 0-10 cm (3.44 kg cm^{-2} 、表-6) において表面積合計は小さく、土壌硬度が有意に小さい神戸調査地 0-10 cm (1.96 kg cm^{-2} 、表-6) で表面積合計は大きかった。

4. 考 察

4.1 根の破断と土壌環境

引き抜き試験時に破断根系が最も多かったのは、クロマツの神戸調査地であり、破断根系の割合は 62.7% であった (表-2)。この調査地の容積重と土壌硬度は、他のクロマツ調査地と比較して有意に大きかった (表-6)。この調査地では土壌圧密が大きく、根系のより先端に近い位置では、根にかかる引張抵抗力より、土壌と根との間に生じる周面摩擦力の方が大きくなるために、根の破断が生じ⁹⁾やすかったものと推察される。

4.2 根破断の有無が根元直径-引き抜き抵抗力の関係に及ぼす影響

破断根を含む根系と破断根を含まない根系で、根元直径と引き抜き抵抗力との関係式を比較した結果、クロマツ、スギのいずれの調査地においても、破断根を含む根系の方が回帰

係数 a は大きく (表-3)、同じ根元直径であれば、引き抜き抵抗力は大きくなる傾向がみられた。この理由は、根の破断が生じる条件が周面摩擦力 $\geq$ 引張抵抗力である⁹⁾ことから、破断根系では、引張抵抗力を上回る周面摩擦力の分だけ、引き抜き抵抗力が大きくなったためと考えられる。

一方、決定係数 R^2 は、破断根を含む根系の方が大きくなる調査地 (クロマツの田原 B 調査地、スギの宍粟調査地) と、破断根を含まない根系の方が大きくなる調査地 (クロマツの神戸調査地、新温泉調査地、田原 A 調査地、スギの神戸調査地) があり (表-3)、一定の傾向はみられなかった。

破断根を含む根系と破断根を含まない根系のいずれにおいても、同一樹種であれば、根元直径-引き抜き抵抗力の関係式に、調査地による有意差はみられなかったことから、樹種ごとに関係式を統合した。破断根を含む根系では、クロマツ $T = 19.4 \times D^{1.5}$ ($R^2 = 0.716$) (図-3)、スギ $T = 33.6 \times D^{1.5}$ ($R^2 = 0.792$) (図-4)、破断根を含まない根系では、クロマツ $T = 18.4 \times D^{1.5}$ ($R^2 = 0.738$)、スギ $T = 33.5 \times D^{1.5}$ ($R^2 = 0.810$) であり、破断根の有無にかかわらず、決定係数 R^2 はいずれも 0.7 以上の大きい値を示した。

以上のことから、根元直径を用いることで、生育場所によ

図-3 根元直径と引き抜き抵抗力との関係 (クロマツ)

Fig. 3 Relationship between basal root diameter and pull-out resistance (*Pinus thunbergii*).

図-4 根元直径と引き抜き抵抗力との関係 (スギ)

Fig. 4 Relationship between basal root diameter and pull-out resistance (*Cryptomeria japonica*)

らず、高い精度で引き抜き抵抗力を推定できることが明らかとなった。ところで、任意の根元直径を有する根系が引き抜き抵抗力を発揮する際に、破断が生じるかどうかを予測するためには、引張抵抗力和周面摩擦力との関係を知る必要がある。しかし1本1本の根系に破断が生じるかどうかは、その根系周辺の局所的な土壌圧密に左右されるため、正確に予測することは困難と考えられる。野外条件下において、破断根が生じる確率は0でない(本研究の破断率は24.1-62.7%, 表-2) ことに鑑みると、破断根を含む根系から得られた根元直径-引き抜き抵抗力の関係式を用いた方が、現地に即した引き抜き抵抗力の推定に適していると考えられる。

4.3 根元直径以外の根系パラメータと引き抜き抵抗力和の関係

根元直径以外の根系パラメータのうち、 $\Sigma(\text{Length})_i$, $\Sigma(\text{Surface area})_i$, $\Sigma(\text{Volume})_i$, $\Sigma((\text{Surface area})_i \times (\cos \text{Angle}))_i$, $\Sigma((\text{Volume})_i \times (\cos \text{Angle}))_i$ の5つのパラメータは、引き抜き抵抗力和との相関が高かった(表-4)。実験的には、主軸根と側根との分岐角度¹⁰⁾や根の方向性⁵⁾が引き抜き抵抗力和に寄与することが指摘されている。本研究の野外条件下においては、引き抜き抵抗力和と $\Sigma(\text{Surface area})_i$ 、または引き抜き抵抗力和と $\Sigma((\text{Surface area})_i \times (\cos \text{Angle}))_i$ との相関係数に大きな違いはみられなかった(表-4)。この傾向は $\Sigma(\text{Volume})_i$ 、または $\Sigma((\text{Volume})_i \times (\cos \text{Angle}))_i$ との相関係数についても同様であり、分岐角度や根の方向性を考慮しても、引き抜き抵抗力の推定が高まる可能性は低かった。さらにこれら5つのパラメータは、根元直径との間に高い相関がみられる(表-5)、また、根元直径ほど相関係数が高くない(表-4)ことから、引き抜き抵抗力は根元直径で推定するのがよいと結論付けられる。

4.4 根系パラメータの変化と引き抜き抵抗力和との関係に与える土壌環境の影響

土壌圧密の低い土壌環境では、引き抜き抵抗力和に寄与する表面積合計は大きくなることがわかった(図-2)。すなわち、根元直径あたりの表面積合計は、容積重や土壌硬度によって変化し、場所差の影響を受けることが示唆された。土壌圧密は根系構造を変化させ、容積重が小さいと、根が長く⁸⁾、0.5 mm未満の細根割合が多くなる³⁾ことが指摘されていることから、長さや体積などの他の根系パラメータについても、表面積と同様に場所による影響を受けることが推察される。

一方、根元直径と引き抜き抵抗力和との関係式に、場所による有意差はみられなかった(図-3, 図-4)。このことは、引き抜き抵抗力和に影響する周面摩擦力は、根系の表面積と単位表面積あたりの周面摩擦力との積で表される⁹⁾ことと関係している。すなわち、根元直径が等しい場合、容積重や土壌硬度が小さくなると、根系の表面積は大きくなるものの、土壌圧密が小さくなるために単位表面積あたりの周面摩擦力は小さくなり、逆に容積重や土壌硬度が大きくなると、根系の表面積は小さくなるものの、土壌圧密が大きくなるために単位表面積あたりの周面摩擦力も大きくなることで、その積である周面摩擦力はほぼ一定となり、結果として、根元直径は場

所差の影響を受けずに、引き抜き抵抗力和との間に一定の関係式が得られたものと推察される。

5. おわりに

本研究において、代表的な高木樹種であるクロマツとスギの根元直径-引き抜き抵抗力的の関係式を構築した。さらに根元直径は、生育場所の影響を受けないパラメータであり、引き抜き抵抗力を推定するのに適した指標であることを明らかにした。しかしながら本研究では、30 cmより深い位置に分布する根については、十分なデータを蓄積できていない。根の深さによって引き抜き抵抗力和に差があるとの知見⁹⁾があることから、今後は、より深い位置に分布する根の引き抜き試験データを収集し、解析する必要がある。

謝辞: 本研究の遂行にあたり、愛知県栽培漁業センターの皆様、愛知県森林・林業技術センターの中島寛文氏、神戸市公園部および新温泉町農林水産課の皆様には調査地の提供でお世話になりました。また、兵庫県立農林水産技術総合センターの橋本忠義氏、中川勉氏には、調査実施にご協力をいただきました。ここに感謝するとともにお礼申し上げます。本研究は、科学研究費助成事業(基盤研究A: 課題番号25252027, 代表平野恭弘)の助成を受けて実施しました。

引用文献

- 1) 阿部和時(1996) 原位置一面せん断試験によるスギ根系の斜面崩壊防止機能の研究, 日本緑化工学会誌, 22(2): 95-108.
- 2) 阿部和時(1997) 樹木根系が持つ斜面崩壊防止機能評価方法に関する研究, 森林総研研報, 373: 105-181.
- 3) Alameda, D. and Villar, R. (2012) Linking root traits to plant physiology and growth in *Fraxinus angustifolia* Vahl. seedling under soil compaction conditions. *Environmental and Experimental Botany*, 79: 49-57.
- 4) Dupuy, L., Fourcaud, T. and Stokes, A. (2005) A numerical investigation into factors affecting the anchorage of roots in tension. *Eur J Soil Sci*, 56: 319-327.
- 5) Giadrossich, F., Schwarz, M., Cohen, D., Preti, F. and Or, D. (2013) Mechanical interactions between neighbouring roots during pullout tests. *Plant Soil*, 367: 391-406.
- 6) 木下篤彦・坂井佑介・大野亮一・田畑三郎・川島正照・山崎孝成(2013) スギ・ヒノキ林における水平根が発揮する抵抗力的の検討, 砂防学会誌, 65(5): 11-20.
- 7) 北原曜(2010) 森林根系の崩壊防止機能, 水利科学, 311: 11-37.
- 8) Misra, R.K. and Gibbons, A.K. (1996) Growth and morphology of eucalypt seedling-roots, in relation to soil strength arising from compaction. *Plant Soil*, 182: 1-11.
- 9) 奥中大智・北原曜・小野裕(2014) 引き抜き試験時における根の破断位置の推定, 中部森林研究, 62: 87-90.
- 10) Stocks, A., Ball, J., Fitter, A.H., Brain, P. and Coutts, M.P. (1996) An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. *Ann Bot*, 78(4): 415-421.
- 11) 塚本良則(1987) 樹木根系の崩壊防止効果に関する研究, 東京農工大学演習林報告, 23: 65-124.

(2015. 9. 24 受理)